

激光与光电子学进展

弱反射光纤光栅阵列制备、解调与应用进展

黄俊斌^{1*}, 丁朋^{1,2}, 唐劲松²

¹海军工程大学兵器工程学院, 湖北 武汉 430033;

²海军工程大学电子工程学院, 湖北 武汉 430033

摘要 弱反射光纤光栅(WFBG)阵列由于具有单纤抗拉强度、大规模复用等特性,近年来得到广泛关注,其在大规模结构健康监测和甚低频水声信号探测等领域具有潜在的应用价值。系统地综述了WFBG阵列的制备、解调与应用进展。在WFBG阵列制备方面,刻栅装置主要以拉丝塔Talbot和相位掩模板技术为主,在光纤选型上则相继出现了紫外透明涂覆层光纤、掺铈光纤等。在信号解调方面,大致有时域波长、频域、微波光子和匹配干涉等四种解调技术。在应用方面,WFBG阵列可以作为制备激光器的器件和传感器应用于监测领域。

关键词 传感器; 弱反射光纤光栅; 拉丝塔光栅; 信号解调; 激光器制备; 结构健康监测

中图分类号 TN253

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1700005

Progress in Fabrication, Demodulation and Application of Weak-Reflection Fiber Bragg Grating Array

Huang Junbin^{1*}, Ding Peng^{1,2}, Tang Jinsong²

¹Department of Weapon Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033, China;

²College of Electronic Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033, China

Abstract A weak-reflection fiber Bragg grating (WFBG) array has been widely concerned due to its characteristics such as single fiber tensile strength and large-scale multiplexing in recent years. These characteristics make it have potential application value in large-scale structural health monitoring and very-low-frequency (VLF) underwater acoustic signal detection. In this paper, the fabrication, demodulation and application progress of WFBG arrays are systematically reviewed. In the fabrication of WFBG arrays, the grating device is mainly with the drawing-tower Talbot and phase mask technology. In the selection of optical fibers, there are ultraviolet transparent coated fibers, cerium doped fibers, and so on. In the term of signal demodulation, it can be roughly divided into four demodulation technologies: time domain wavelength, frequency domain, microwave photons and matched interference. In the term of application, WFBG arrays can be used as a laser device or as a sensor for monitoring.

Key words sensors; weak-reflection fiber Bragg grating; drawing-tower grating; signal demodulation; laser preparation; structural health monitoring

OCIS codes 280.4788; 060.3735; 060.4230; 120.1880

1 引言

伴随着光纤通信的高速发展,光纤传感以其独

特的高灵敏度、易于小型化、可多参数测量和抗电磁干扰等特性而得到广泛应用,大到桥梁、高塔^[1],长到管道、隧道^[2],深到江海、矿井^[3],远到航空、航

收稿日期: 2020-12-30; 修回日期: 2021-01-01; 录用日期: 2021-01-06

通信作者: *tsyj98_nue@163.com

天^[4],小到生物、化学^[5]等领域都能见到光纤传感器的身影。传统的光纤传感器^[6-7]主要有干涉型(如 Fabry-Perot、Sagnac、Mach-Zehnder、Michelson 等),光纤光栅型[如光纤布拉格光栅(FBG)、啁啾光纤布拉格光栅(CFBG)、相移光栅、长周期光栅、倾斜光栅、采样光栅、动态光栅等]和分布式光纤型^[8-9](如基于瑞利散射、布里渊散射、拉曼散射的分布式光纤)。在此基础上,内联干涉结构^[10-11](如微纳光纤、单模-多模-单模、光纤凹槽、模间干涉、端面镀膜)和准分布式结构^[12][如弱反射光纤光栅(WFBG)阵列]也都相继问世,并应用于人类生产生活中。

WFBG 是反射率低于 0.01% 的 FBG。WFBG 阵列融合了常规干涉^[6-7]、内联干涉^[10-11]、光纤光栅^[2, 13]、分布式光纤^[8-9]传感的思想,在一根光纤上复用了上千个 WFBG, WFBG 反射率通常小于 0.01%, 3 dB 带宽为 2 pm~8 nm, 栅长为 9 mm~10 cm, 光栅间隔最小达到 1 mm。WFBG 反射率低且没有熔接点,与普通 FBG 比较,复用能力得到极大增强;由于反射光强大于瑞利散射光强,与分布式光纤传感比较,信号的解调速度也有较大优势。因此,弱反射光纤光栅具有巨大的应用前景。本文从 WFBG 阵列的制备、信号解调和应用三个大方面进行综述,最后进行了展望。

2 弱反射光纤光栅阵列的制备

在 FBG 的制备过程中,通常利用紫外光^[14-15]或飞秒激光^[16]照射光纤(普通单模、掺杂^[17]、载氢^[18]等类型),使其折射率发生永久周期改变。WFBG 是反射率小于 0.01% 的 FBG。1992 年,Askins 等^[19]采用尺寸为 5 mm×20 mm、脉冲宽度为 20 ns、能量为 0.1 J 的 KrF 矩形光束,通过干涉系统对掺锗光纤单脉冲进行曝光处理,形成了反射率低于 2%、线宽约为 0.1 nm 的 WFBG,并预言这种 WFBG 可以作为单元构成序列化、分布式、可寻址的传感器阵列,而实现方式则是在以低于 5 m/s 速度制备光纤的同时进行单脉冲曝光以刻制光栅。

1993 年,Archambaut 等^[20]通过控制干涉条纹宽度刻制了线宽分别为 1 nm 和 0.05 nm 的 WFBG,将光源能量密度从 0.5 J/cm² 提升到 25 J/cm²,FBG 的反射率从 7% 变化到 65%,但反射光谱出现了啁啾分裂。同年,Dong 等^[21]利用光纤拉丝实现了在线制备 WFBG,拉丝速度控制为 3~23 m/min,光栅的反

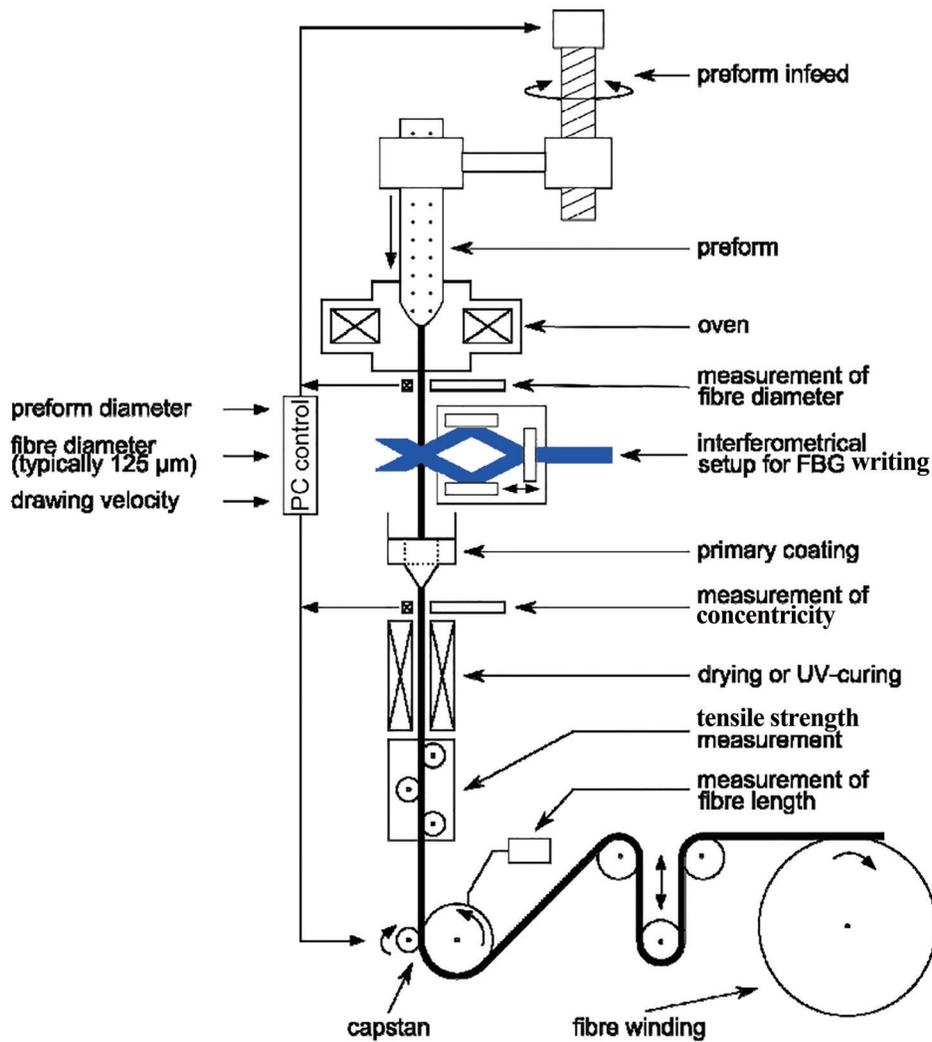
射波形出现多峰、不对称等问题,并指出可以通过提高光源光斑质量来提高光栅的质量。

1994 年,Askins 等^[22]通过计算机自动控制刻栅系统反射镜的角度,实现了 450 个不同中心波长 WFBG 的制备,但这些 WFBG 的反射率和线宽都不尽相同,他们指出制备高质量的 WFBG 阵列不仅需要稳定可控的光路,还需要高光敏均匀掺锗光纤预制棒。

德国光子技术研究所(IPHT)和德国光纤布拉格光栅传感器公司(FBGS)已经实现了 WFBG 阵列的商业量产。其中,2004 年,Rothhardt 等^[23]通过 Talbot 系统分别在掺杂浓度(摩尔分数)为 15% 的掺锗载氢光纤和掺杂浓度(摩尔分数)为 9% 的锗硼共掺载氢光纤上制备了反射率为 30% 和 10% 的 100-WFBG 阵列,传输损耗高达 16 dB/km。2010 年,Rothhardt 等^[24]通过优化光敏光纤预制棒,制备了 1000-FBG 阵列,传输损耗仅为 3 dB/km。2014 年,Lindner 等^[25]在双折射光纤快、慢轴上刻制了 WFBG,温度灵敏度分别为 12.0 pm/K 和 11.4 pm/K,应变灵敏度分别为 1.28 pm/($\mu\text{m}/\text{m}$) 和 1.29 pm/($\mu\text{m}/\text{m}$)。

图 1 所示为在线拉丝塔 Talbot 刻栅系统^[25],该系统包含拉丝装置(加热炉、冷却器),刻栅装置(紫外激光器、分光用相位掩模板、0 级衍射遮光板、3" 可旋转介质电镜),涂覆装置(树脂涂覆、紫外固化灯)和动力收集装置(诱导轮、前进轮、收线轴)。利用拉丝塔对掺杂光纤预制棒进行拉丝处理;紫外激光被相位掩模板分成两束衍射光,衍射光被 3" 介质电镜反射后会聚在一起发生干涉,干涉光的折射率在光纤纤芯中被周期性调制。通过旋转介质电镜的角度,可以刻制不同波长的 WFBG,但该方法对电镜角度的控制要求非常高,10⁻⁵量级的旋转精度对应 1 nm 波长精度。另外,光刻工作台的隔离和拉丝系统环境也会影响波长的变化,这对刻制波长相同的 WFBG 是不利的。

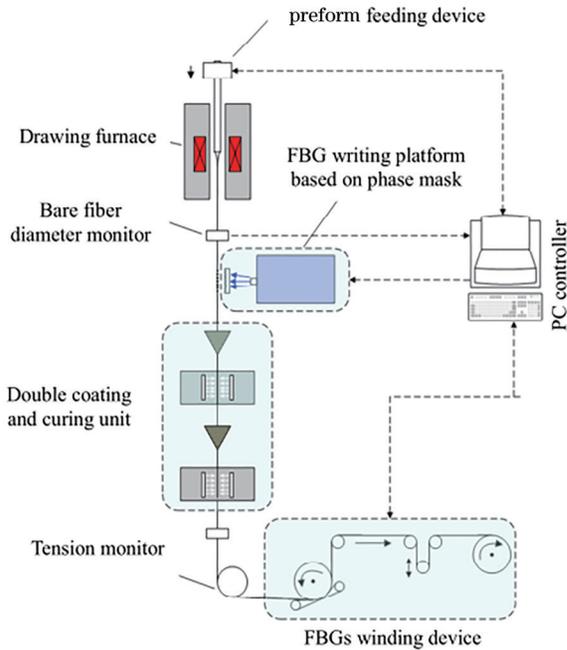
武汉理工大学姜德生团队在光纤光栅阵列研究方面取得不错的成绩^[26]。2013 年,Guo 等^[27]利用在线拉丝塔相位掩模板系统进行刻栅,拉丝塔的拉丝速度控制在 3~200 m/min 之间,制备的光纤直径为 0.125 mm;窄线宽 ArF 准分子激光器的光束尺寸为 4 mm×12 mm,脉宽为 10 ns,最大脉冲能量为 40 mJ;分别在 GeO₂(摩尔分数为 18%) 和 B₂O₃(摩尔分数为 10%) 共掺光纤、GeO₂(摩尔分数为 18%)

图1 在线拉丝塔 Talbot 刻栅系统^[25]Fig. 1 On-line FBG fabrication system using drawing-tower Talbot^[25]

光纤和载氢光纤上制备出 200-WFBG 阵列,但传输损耗较大。同年,Guo 等^[28]通过将拉丝速率控制为 12 m/min,将平均拉丝张力控制为 38.2g,制备出了 300-WFBG 阵列,该 300-WFBG 阵列的平均反射率约为 0.26%,波形较为对称,3 dB 带宽低于 0.1 nm,但平均反射率的相对偏差为 $\pm 16\%$,这可能是激光脉冲的不稳定造成了曝光能量不均匀或者是由光纤的振动引起的。2015 年,Zheng 等^[29]指出,光栅的相移、不对称切趾和线性调频会引起 WFBG 反射光谱的畸变,主要原因在于光源光斑的质量较低。同年,Guo 等^[30]研究了 WFBG 阵列中每个 WFBG 反射率不一致的问题,发现光栅折射率分布受拉丝塔光纤纵向振动的影响较大,建议减少光纤收集装置的振动,并且保持匀速运动,将 WFBG 反射率的波动控制在 10 dB 以内。

图 2 所示为在线拉丝塔相位掩模板刻栅系统^[28],该系统包含拉丝装置(加热炉、冷却器),刻栅装置(紫外激光器、透镜、相位掩模板),涂覆装置(树脂涂覆、紫外固化灯)和动力收集装置(诱导轮、前进轮、收线轴)。利用拉丝塔对掺杂光纤预制棒进行拉丝处理后,通过相位掩模板刻栅系统刻制 WFBG,再利用涂覆装置进行涂覆,通过计算机实现各个子系统的实时自动控制,该系统在刻制波长一致的 WFBG 阵列方面有着天然的优势。

除了上述较为成熟的拉丝塔在线刻栅技术,国内外其他研究团队也对 WFBG 制备有着深入的研究。2012 年,Wang 等^[31]基于 355 nm 激光,利用紫外光透明的涂覆层光纤进行了刻栅,曝光时系统处于静止状态,并通过光纤夹具和可移动平台,精确控制光纤运动,调节光栅长度和相邻光栅的间隔。

图2 在线拉丝塔相位掩模板刻栅系统^[28]Fig. 2 On-line FBG fabrication system using drawing-tower and phase mask^[28]

2012年,孙琪真等^[32]采用CO₂激光在线剥除光纤的涂覆层,而后采用相位掩模板进行刻栅。2016年, Jiang等^[33]基于248 nm激光,通过相位掩模板依靠常规单模光纤的弱光敏性直接在该光纤上进行了刻栅。2016年,Chen等^[34]采用波长为800 nm、脉冲宽度为200 fs、重复频率为250 kHz、功率为1 W的钛宝石飞秒激光在康宁SMF-28单模光纤上进行了点对点刻栅。2017年,Tokarev等^[35]采用Talbot系统在紫外透明的涂覆光纤上刻制了3.5 nm带宽的CFBG,使用波长为248 nm、重复频率为10 Hz、能量密度为70 mJ/cm²的激光曝光200 s,啁啾相位掩模板周期为706.5 nm,啁啾速率为2.3 nm/cm,光纤涂覆层为三氟氯乙烯和偏氟乙烯的共聚物,纤芯掺锗浓度为18%(摩尔分数),传输损耗为4.5 dB/km。2019年,Monet等^[36]提出一种基于随机噪声生成的Rogue光栅,3 dB带宽高达8 nm,栅体传输损耗仅为0.15 dB/m,实现方法是基于Talbot刻栅系统增加随机振动的压电陶瓷(PZT)以带动分光用相位掩模板振动。2019年,Elsmann等^[37]对掺铈(Ce)光纤的光敏性进行了研究,通过单脉冲曝光,掺杂浓度为掺锗光纤掺杂浓度1/500的掺铈光纤也展现出了相当的光敏性,但形成的光栅迅速退化;进行多脉冲曝光后,能够形成永久性折射率变化。

拉丝塔相位掩模板和Talbot在线刻栅系统在

制备大批量WFBG阵列方面有着巨大优势,但该系统体积庞大、造价昂贵、系统各部件配合要求高,制约了WFBG阵列制备的普及。剥离涂覆层在线刻栅的方法增加了系统的复杂性,剥离涂覆层的过程容易造成光纤损伤甚至断裂。涂覆光纤在离线制备大批量WFBG阵列上没有优势,但将来有望实现涂覆光纤在线制备大批量WFBG阵列,这将对WFBG阵列的制备和推广应用产生深远影响。此外,飞秒激光制备WFBG阵列刚刚起步,所制备的WFBG阵列在反射率起伏、3 dB带宽控制方面有待改善。综上所述,WFBG阵列制备主要采用Talbot、相位掩模板和飞秒激光技术,光纤主要有常规单模、Ge/B共掺和掺Ge光纤,刻写技术从剥离涂覆层、裸光纤刻写向在外包涂覆层的光纤上直接刻技术发展。WFBG阵列水听器拖线阵制备可以依托现有的基于相位掩模板的拉丝塔在线刻栅技术,但该在线刻栅技术偶尔有“漏栅”的现象(即WFBG阵列上某个预计位置没有刻上WFBG),需要高度关注。

3 弱反射光纤光栅阵列的解调

WFBG阵列信号检测主要是检测WFBG的反射中心波长或者激光在相邻WFBG之间光纤中传输的相位变化,利用中心波长或者相位变化感知外界温度、应变等物理量的变化^[38]。WFBG阵列解调大致可划分为时域波长解调、频域解调、微波光子解调和匹配干涉解调等技术,也包括某几个技术的联合解调。

3.1 时域波长的解调

时域波长解调的基本思想是,从时域上分辨出不同的WFBG,通过波长解调装置分辨出WFBG的反射中心波长。

基于常规的波长解调装置,如边缘滤波、扫描光源、可调谐Fabry-Perot腔等^[39],解调WFBG中心波长。2002年,Valente等^[40]采用Agilent E6003A光纤时域反射计(OTDR)观测了20个WFBG的时域反射谱,并通过可调谐Fabry-Perot腔观测了单个WFBG受应力之后的波长漂移情况。2003年,Valente等^[41]通过在OTDR里加入一个可调谐光谱带通滤波器进行了时域波长解调。2004年,张伟刚等^[42]在时分、空分的基础上通过双光纤光栅扫描调谐机构实现了FBG波长的解调。2009年,Dai等^[43]在采用时分和光谱仪检测波长时,把半导体脉冲光

放大器放在光纤环内,将光纤环的延迟时间设置为脉冲光在相邻FBG光纤内传输时间的2倍,则每个周期脉冲内的光都会循环放大,光栅的阴影效应得到降低。2012年,Zhang等^[44]提出了波长时域解调准分布式大复用容量的弱反射光纤光栅阵列传感网络,该传感网络可以复用1000个中心波长为1536.5 nm、反射率为6%、带宽为0.07 nm的WFBG。2015年,Wang等^[45]在时分系统中插入两根CFBG来检测3-FBG阵列,应变灵敏度和温度灵敏度分别为 $4.2 \times 10^{-4} / \mu\epsilon$ 和 $5.9 \times 10^{-3} / ^\circ\text{C}$ 。2016年,王一鸣等^[46]采用连续扫频激光解调反射率为1%、间隔为20 m的18-FBG阵列,解调准确度为15 pm、分辨率为1 pm,解调频率达到120 kHz,解调系统的核心器件为高速傅里叶域锁模扫描扫频激光和用于标定波长的高稳定梳状滤波器。2017年,Han等^[47]把342-FBG阵列(反射率为0.01%、间隔为2.5 m、总长为855 m)反射回来的光分为两路,其中一路经过窄带滤波器,波长变化导致光强发生变化,并且通过两路光强相除消除了光源光强的波动,波长精度为0.22 pm,应变分辨率为222 ne,可测量2 kHz的振动信号。2018年,Liu等^[48]在时域脉冲的基础上,采用傅里叶域锁模激光器同时判断各个WFBG时域反射脉冲的波长变化,利用35-FBG测量温度和应变,线性度达0.9993,询问频率达到100 kHz,如图3所示。

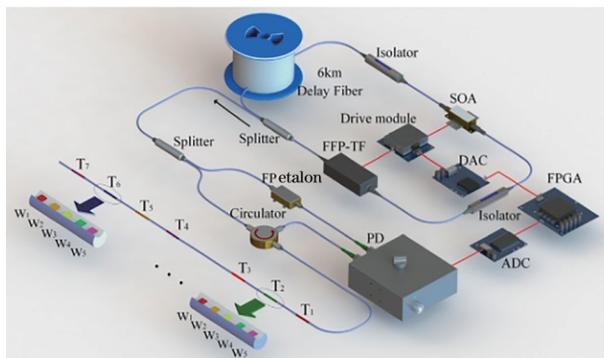


图3 采用傅里叶域锁模激光器和Fabry-Perot标准具解调WFBG阵列^[48]

Fig. 3 Demodulation of WFBG array using Fourier domain mode-locked laser and Fabry-Perot etalon^[48]

在多光源输入条件下,当WFBG中心波长发生漂移时,对应光源的反射光强发生变化。2013年,Luo等^[49]利用两个半导体放大器形成的光脉冲作用于WFBG,当某个WFBG的波长发生漂移时,作用于WFBG的两个光脉冲光强会发生变化,记录下该

WFBG的编号,通过可调谐激光器扫描即可获得该WFBG的波长。2014年,Hu等^[50]在时域上同样采用两个半导体放大器形成光脉冲,将波长检测换成高速率CCD探测器,843-WFBG阵列被解调出来,空间分辨率达到2 m。2013年,张燕君等^[51]采用三个多波长可调谐激光器解调多组波长与之对应的WFBG阵列,首先通过时域解调出每一组FBG,而后根据每组FBG各个反射光强的变化来判别波长的漂移量。2016年,Cheng等^[52]采用双波长脉冲光解调7-WFBG阵列,WFBG波长发生漂移,反射回来的两个不同波长激光的光强发生变化。2017年,Rohollahnejad等^[53]采用三个不同波长的激光检测WFBG阵列,当WFBG的波长发生漂移时,三个波长反射光的光强均会发生变化,该方法的平均应变灵敏度为 $0.54 \text{ dB} / \mu\epsilon$,应变检测范围达 $3000 \mu\epsilon$,如图4所示。

当混沌激光输入时,分光后进行互相关运算,互相关系数的峰值位置对应不同WFBG位置,峰值大小反映了WFBG中心波长的漂移情况。2015年,Zhang等^[54]采用一个混沌激光器并将发射光分为两路,其中一路作为参考信号,另一路经WFBG阵列反射,对5-WFBG阵列进行解调,通过相关系数的峰值位置分辨出WFBG的序列,通过峰值大小变化分辨出波长的漂移量,测量应变误差为 $14 \mu\epsilon$,空间分辨率为7 mm,如图5所示。2015年,Arias等^[55]基于同样的原理,将光源换成了基于量子相位波动的激光,利用分布反馈式(DFB)二极管和Michelson干涉仪(臂差超过激光相干长度)形成混沌激光。2017年,Yi等^[56]采用两个FBG从混沌激光中滤出两个窄线光,并将其传输至两个WFBG中,当两个WFBG波长漂移时,光谱的相关峰强度将会发生改变,检测液位变化灵敏度为 $0.019 / \text{mm}$,检测精度为3 mm。

把WFBG中心波长的漂移测量转换为色散的测量。2016年,Ma等^[57]采用宽谱脉冲光源,将反射回来的脉冲光分为两路,一路作为参考光,另一路串联色散延迟线,当WFBG波长发生变化时,通过相关计算即可得出时延变化,进而解调2014-WFBG阵列(反射率为-35 dB、间隔为1 m),应变灵敏度为 $9.03 \text{ pm} / \mu\epsilon$,20 kHz动态应变为 $0.3 \text{ pm} / \text{Hz}^{1/2}$,如图6所示。2019年,Sartiano等^[58]在时域脉冲的基础上,通过色散调制装置解调WFBG反射波长的变化,测量了500-WFBG阵列(总长为5 m、空间分辨率为1 mm)的温度和应变,温度分辨率为 1°C ,应变

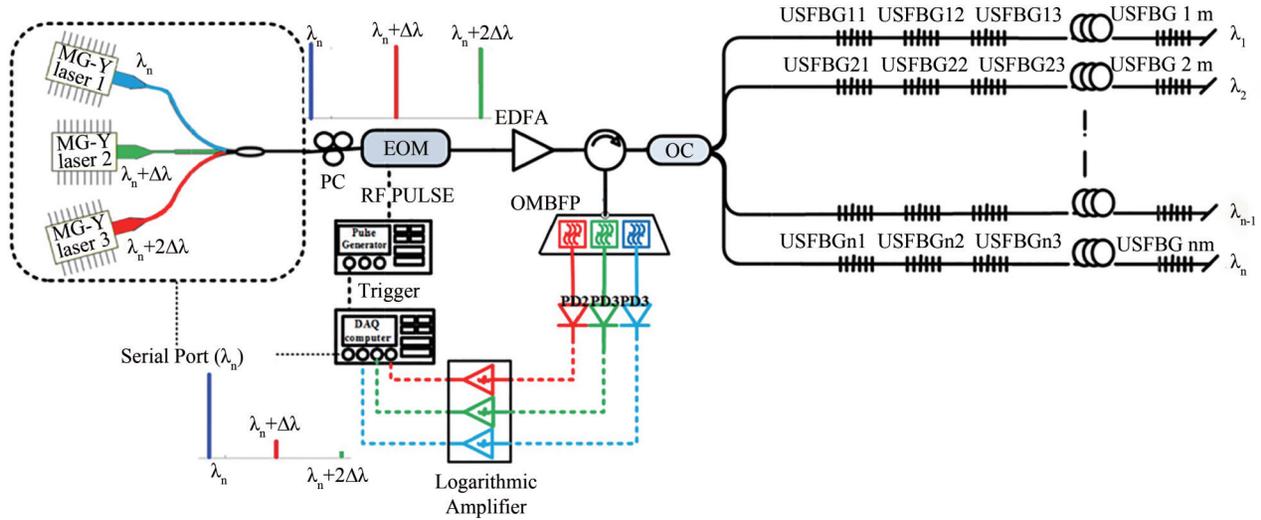


图 4 采用三个不同波长的激光器脉解调 WFBG 阵列^[53]

Fig. 4 Demodulation of WFBG array using three lasers with different wavelengths^[53]

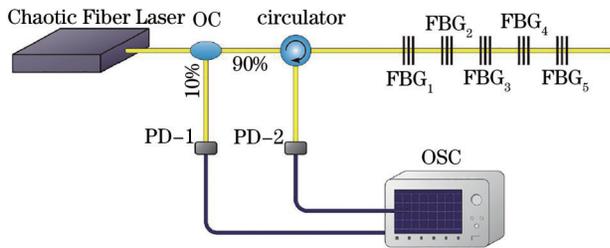


图 5 采用混沌激光解调 WFBG 阵列^[54]

Fig. 5 Demodulation of WFBG array using chaotic laser^[54]

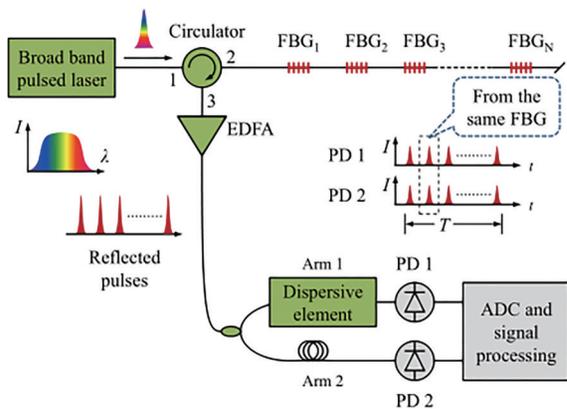


图 6 采用色散延迟线解调 WFBG 阵列^[57]

Fig. 6 Demodulation of WFBG array using dispersive delay line^[57]

分辨率为 $1.2 \mu\epsilon$ 。

综上所述,为了实现高速、高空间分辨率的时域波长解调,必须使用较短的脉冲光或者嵌入时延较小的混沌光,并且需要波长解调装置速度较快。傅里叶域锁模激光器和混沌激光器的发展将推动 WFBG 阵列的波长解调向超高速、超高空间分辨率方向发展。

3.2 频域解调

频域解调的核心思想是,把 WFBG 看作“宽谱反射镜”,激光在相邻 WFBG 之间光纤中传输时,将相位变化转化为频域谱中频率的漂移,或者把 WFBG 中心波长的漂移转化为色散时延的变化,进而求解出频谱中线谱的漂移。频域解调主要分为非相干和相干两种,非相干光频域技术需要光源参考信号,而相干频域技术较为常用,通过构建干涉仪来测量相干光的频率。通过线性改变光源频率,如采用内调制扫描光源(图 7^[59])、外调制声光移频器(AOM,图 8^[60])等,将 WFBG 反射回来的光与反射镜返回的光进行拍频,而后通过快速傅里叶变换(FFT)即可得到振幅-频率谱。线性调频激光(调频

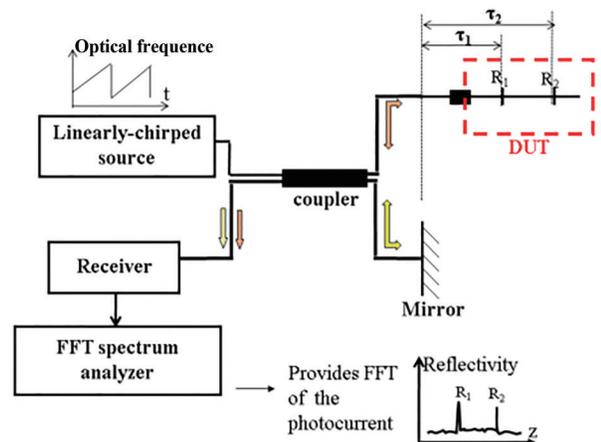


图 7 基于线性扫频光源的频域解调 WFBG 阵列^[59]

Fig. 7 Frequency-domain demodulation of WFBG array using linear sweep laser^[59]

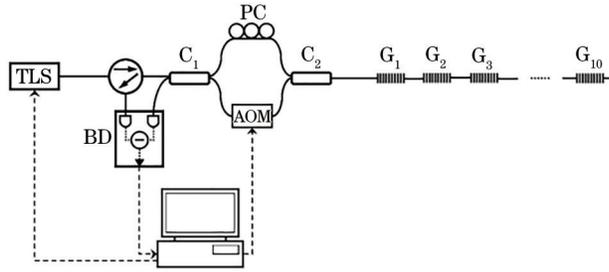


图 8 基于声光调制器线性调频的频域解调 WFBG 阵列^[60]
Fig. 8 Frequency-domain demodulation of WFBG array using acoustic-optic modulator with linear frequency modulation^[60]

周期为 T 的出射光场强 $a_0(t)$ ^[61] 为

$$a_0(t) = a_0 \exp\{j2\pi[v_0 + (\gamma/2)t]t\}, 0 \leq t \leq T, (1)$$

式中： a_0 为振幅； v_0 为激光的初始频率； γ 为扫频速率。

探测器接收到的光强 $U_{PD}(t)$ 为

$$U_{PD}(t) = \sigma \left| a_0(t) + \sum_1^M r_{\text{meff}} a_0(t - \tau_m) \right|^2, (2)$$

式中： σ 为探测器的灵敏度系数； M 为 WFBG 的个数； r_{meff} 为第 m 个 WFBG 与反射率有关的常数； τ_m 为光源发出的激光被第 m 个 WFBG 反射到达探测器的时间，即 $\tau_m = 2n_{\text{eff}}L_m/c$ ，其中 n_{eff} 为光纤的有效折射率， L_m 为第 m 个 WFBG 到耦合器的距离， c 为光在真空中的速度。 $U_{PD}(t)$ 的交流项为 $U_{PD,AC}(t)$ ：

$$U_{PD,AC}(t) = 2\sigma a_0^2 \sum_1^M r_{\text{meff}} \cos(2\pi\gamma\tau_m t + \psi_m), (3)$$

式中： ψ_m 是每个 WFBG 反射光的初始相位，为常数。对 (3) 式进行 FFT 计算，即可得到由 m 个频率分别为 $2\pi\gamma\tau_m$ 的线谱组成的振幅-频谱图。当外界物理量作用到光纤光栅阵列上时， n_{eff} 和 L_m 发生变化，振幅-频率谱上的线谱发生漂移。

2011 年，Yüksel 等^[62] 把温度加载在 FBG 上，利用 FBG 的色散变化来进行解调，测量标准差低于 1.5°C 。

加拿大研究者开展了相关工作^[63]。2008 年，Ye 等^[60] 采用外调制方式，通过在 Mach-Zehnder 一个臂上增加 AOM 来进行线性频移，10-FBG 阵列（反射率约为 4%）被解调，信噪比达 48 dB，串扰影响控制在 -34 dB 以内。2013 年，Qi 等^[64] 采用调制频率高达 4.5~5.5 GHz 的 LiNbO₃ 相位调制器取代 Mach-Zehnder 调制器，最小空间解调精度可达 0.1 m。2016 年，Zhang 等^[65] 采用宽谱非相干光源取代常规的窄线宽单频激光源，通过双向调制电光调

制器 (EOM) 驱动线性频移信号变为线性调频信号，并利用低速探测器自动滤除高频干涉分量；理论推导时把宽谱光源看作一系列单频未锁模的线光源，利用 LiNbO₃ 调制后，基于 Bessel 函数展开，滤除高频分量，得到的光强频域信号是一组与 WFBG 栅距和线性调频率乘积相关的线谱。实验结果显示，该方法在相位调制频率为 2.7~3.2 GHz（步长为 41.7 kHz）时的空间分辨率为 0.3 m，量程超过 1 km；当高频调制 EOM 时，前、后向射频波速度失配会导致调制效率降低，进而检测信号的信噪比下降。针对这一问题，2019 年，Guo 等^[66] 理论修正了前后射频速率不同时的探测器接收到的光强 Bessel 函数展开式，实验分别分析了双向 EOM 的一个端口接 50 Ω 阻抗匹配和开路两种情况时的调制特性，在频率为 2~8 GHz、步长为 1 MHz 的调制条件下，解调 15-FBG 阵列的空间分辨率达到 3 cm，量程超过 1 km。2019 年，Yang 等^[67] 把线性调频信号加载到 LiBO₃ 晶体上，把放大自辐射光换成了宽谱混沌光，在测量温度变化下，空间分辨率为 10 cm，解调精度为 16 pm。

2015 年，Ou 等^[68] 介绍了频域和波长联合解调的方法，以 Mach-Zehnder 和 AOM 作为线性移频器在频域上辨别 WFBG 阵列中的 WFBG 序号；波长解调时，采用可调谐窄线宽激光器，波长扫描后进行三次样条插值，利用单个 WFBG 光谱光强的变化测出波长的漂移情况，采用 65-WFBG 阵列测量温度，波长精度为 ± 3.9 pm，温度分辨率为 $\pm 0.4^\circ\text{C}$ 。2017 年，Ou 等^[69] 采用文献 [68] 的方法对 363-WFBG 阵列（121 个 WFBG 组，每组含三个不同波长 FBG）进行测温解调，温度分辨率为 $\pm 0.4^\circ\text{C}$ 。2018 年，Ou 等^[70] 把光纤光栅阵列的第一根 WFBG 作为参考 WFBG（反射率已知），采用文献 [68] 的方法测量阵列中每根 WFBG 的振幅-频率谱，即可推算出其他 FBG 的反射率，测量了 60-WFBG 阵列中的 WFBG 反射率，平均峰值反射率约为 -25 dB，反射率范围为 -37.7 dB ~ -21.7 dB，测量稳定性为 ± 1.93 dB。

2015 年，李政颖等^[71] 介绍了频域和波长联合解调的方法，在文献 [68] 系统的基础上增加了一个参考 Michelson 干涉仪，通过频域解调得出 WFBG 序号，再对单个 WFBG 频域信号进行快速傅里叶逆变换得出该测量信号的时间点，与参考信号比对后即可得出 WFBG 波长的漂移量，采用 200-WFBG 阵

列测量 $-10\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度,线性拟合度达 99.6%,空间分辨率为 20 mm。2017 年,Gui 等^[72]在文献 [68] 系统的基础上又增加了一个 Fabry-Perot 标准具,对每一时刻的扫描波长进行校准,对 6680-WFBG 阵列 (WFBG 反射率为 -40 dB , 栅长为 1 mm, 间隔为 $500\text{ }\mu\text{m}$, 阵长为 10 m) 进行解调,温度和应变精度分别为 $1.00\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $20.02\text{ }\mu\epsilon$ 。

2017 年, Sun 等^[73]介绍了时域、波长和频域 3D 联合解调的方法,将脉冲从时域上分为 4 组 (T1~T4),再采用可调谐 Fabry-Perot 滤波器将每组中的 4 个波长 (如 T1-W1~T1-W4) 分开,最后采用 FFT 将每个波长下构建的 4 个不同长度 WFBG Fabry-Perot 微腔 (如 T1-W1-f1~T1-W1-f4) 分开,测量温度时灵敏度为 $11\text{ pm}/^{\circ}\text{C}$,空间分辨率为 0.2 m。2018 年, Wang 等^[74]以文献 [73] 系统为基础在光纤光栅阵列前面串接了 4 根参考 FBG,以解决解调波长时可调谐 Fabry-Perot 滤波器的扫描非线性和环境温度变化的影响,在 1 h 解调温度下,解调的波长精度为 3 pm。2018 年, Cheng 等^[75]构建了 4 组波分、4 组频分共 16 个温度传感器,通过高速可调谐 Fabry-Perot 滤波器和快速傅里叶变换,进行了波分、频分混合解调,实现了频率为 500 Hz、波长分辨率小于 3 pm 的温度解调,分辨率达 $\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

综上所述,为了获得更高的解调精度、解调量程和空间分辨率,需要高稳定、大带宽、快速率的声光/电光相位调制器,同时还需要解决大带宽、超高速率情况下相位调制器出现的非线性、调制干扰以及快速傅里叶变换大数据计算等问题。

3.3 微波光子解调

微波光子解调的基本原理是,射频信号经声光 (电光) 调制器加载到宽谱非相干光源上,调制信号经 WFBG 阵列形成微波光子滤波器 (MWF),当相邻 WFBG 之间的光纤或 WFBG 波长发生变化时, MWF 的时间延迟将发生变化,如图 9 所示^[76]。射频信号在相位调制器上产生的相移 $\phi(t)$ ^[77]为

$$\phi(t) = \phi_{\text{DC}} + \phi_{\text{rf}} \sin(\Omega t), \quad (4)$$

式中: ϕ_{DC} 为相移直流分量; ϕ_{rf} 为交流分量系数; Ω 为射频角频率。调制信号的输出场强 $E(t)$ ^[78]为

$$E(t) = \sqrt{I_0} \sum_{k=0}^{N-1} [a_k \phi_k(t - \tau_k)]^{1/2} \times \exp\{j[\omega_0(t - \tau_k) + \varphi_k]\}, \quad (5)$$

式中: I_0 为光源光强; ω_0 为光源中心角频率; a_k 和 φ_k 分别为第 k 个 WFBG 反射光强衰减系数和初始相

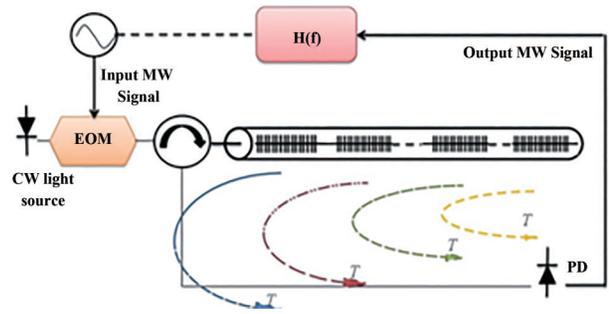


图 9 微波光子解调系统^[76]

Fig. 9 Microwave photonic demodulation system^[76]

位; τ_k 与 (2) 式中的 τ_m 相同; N 为 WFBG 的总数。

当非相干光源输入时,输出光强^[78]为

$$I = I_0 \sum_{k=0}^{N-1} [a_k |\phi_k(t - \tau_k)|]. \quad (6)$$

利用 (6) 式可以把 MWF 看作是线性时不变有限冲击响应滤波器,其频响函数 $H(\Omega)$ ^[79]为

$$H(\Omega) = \sum_{k=0}^{N-1} a_k \exp(-j\Omega\tau_k). \quad (7)$$

采用矢量网络分析仪 (VNA) 对 (7) 式在扫频区间 $0 < \Omega < 2\pi B$ 上进行傅里叶逆变换 (IFFT), 其中 B 为 VNA 的测量带宽。(7) 式的时域冲击响应函数^[79]为

$$h_B(t) = B \sum_{k=0}^{N-1} a_k \exp[j\Omega(t - \tau_k)] \text{sinc}[B(t - \tau_k)]. \quad (8)$$

由 (8) 式可知,时域冲击响应函数在时域上有 N 个 sinc 函数尖峰,这些尖峰的位置由 τ_k 决定。

2014 年, Ricchiuti 等^[76]对 500-WFBG 阵列 (单个 WFBG 长 9 mm, 间隔为 10.21 mm, 总长为 5 m) 进行测温, VNA 扫频范围为 10 MHz~12 GHz, 相位调制器带宽为 500 MHz, 温度灵敏度为 $16.855\text{ pm}/^{\circ}\text{C}$, 精度为 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。2015 年, Xia 等^[80]在图 9 所示系统的基础上增加了光学带通滤波器,当 FBG 波长漂移时, VNA 测量的各个尖峰位置发生变化,同时尖峰的峰值也会发生相应变化 (与波长解调原理一样)。采用 6-WFBG 阵列 (WFBG 反射率为 7%、3 dB 带宽为 1.34 nm) 测量 $0\sim 2000\text{ }\mu\epsilon$ 的应变, EOM 带宽为 2.5 GHz, 探测器带宽为 1.1 GHz, VNA 带宽为 6 GHz, 应变灵敏度为 $0.0452\text{ RAC}/\mu\epsilon$ (RAC 为定义的微波相对振幅响应), 定位精度约为 10.2 cm。2016 年, Clement 等^[81]在图 9 所示系统中插入一根色散延迟线 (DDL), 当 FBG 波长发生漂移时, FBG 会导致时间延迟发生变化,且 DDL 的时间延迟也会发生变化,采用 3-

WFBG 阵列测量 100 °C 内的温度,测量带宽为 10 GHz 时,空间分辨率为 1.2 cm,精度为 ± 0.5 °C。2018 年,Zhou 等^[82]采用线性调频信号调制 EOM,激光分光后一路进入光纤光栅阵列感知振动,另一路作为参考信号,合束拍频后进入 DDL,对探测器光强进行 FFT,即可从频域上观测到振动引起的 FBG 波长变化,其会引起振幅-频率谱中线谱的漂移,解调了 40 kHz 振动信号,空间分辨率为 1 m,精度为 8 pm。2019 年,Liang 等^[83]在图 9 所示系统的基础上,为了补偿环境温度对光纤扰动带来的延时影响,在合束拍频后再次进行分光,其中一路经 DDL 进入探测器 1,另一路经普通单模光纤进入探测器 2,两路光的群速度相反,可以抵消环境温度引起的误差,解调了 80 kHz 振动信号,精度为 6.96 pm。

综上所述,采用微波光子解调仅需普通宽谱非相干光源,但是该方法对相位调制器的稳定性、带宽和调制速率的依赖性很大,并且需要昂贵的 VNA 进行计算;对比时域解调、波长解调和频域解调,微波光子解调方法在高频、超小空间分辨率测量方面有着独特的优势。

3.4 匹配干涉解调

匹配干涉解调方法的基本思路是,光纤光栅阵列中相邻 FBG 反射的光脉冲经过时间上的匹配,形成了干涉信号,当相邻 FBG 之间的光纤受到扰动,干涉信号也会受到影响,通过零差解调或相位载波 (PGC) 解调即可解调出扰动的物理量。

1988 年,Kersey 等^[84]把匹配干涉应用于多个光纤延迟单元的解调中,通过并联连接由非对称 Mach-Zehnder 干涉仪(臂差为 ΔL)组成的延迟单元来感应外界物理量的变化,利用一个臂差同为 ΔL 的 Mach-Zehnder 干涉仪来匹配延迟单元反射回来的光脉冲,即可形成系列干涉脉冲,干涉脉冲包含了相应延迟单元中的长臂光纤 ΔL 、光纤有效折射率变化 Δn_{eff} 的变化信息。

1992 年,Morey 等^[85]提出把光纤延迟单元换成弱反射 FBG,并从理论上介绍了 FBG 反射率、串联个数与串扰之间的关系,得出反射率为 0.001 时可以串接 100 个 FBG,串扰在 -30 dB 左右。

为了解决串扰和偏振问题,2008 年,Waagaard 等^[86]采用 4 个偏振态脉冲 (xx 、 xy 、 yy 和 yx) 询问 6-FBG 阵列(反射率为 5%),并采用层剥离逆散射算法(类似 FBG 折射率重构算法)计算出相邻 FBG 之间光纤的相位变化,串扰被降低到

-40 dB,系统的信噪比增加了 15 dB~20 dB。2009 年,Waagaard 等^[87]采用上述 4 个偏振态脉冲进行询问,利用 4 个偏振态脉冲分别得到的外界振动相位组成 2×2 矩阵,定义该矩阵行列式的相位的 $1/2$ 为最终测得的外界振动相位,由此抑制了 36 dB 的偏振串扰。2016 年,Jiang 等^[33]把 4 个偏振态脉冲与 PGC 方法联合使用,将四个状态的光强分别乘以 $\cos(\omega_0 t)$ 和 $\cos(2\omega_0 t)$ 并滤除光频 ω_0 成分,得到两个系数不同但关于外界相位信号 ϕ_s 的正弦、余弦信号 X_1 、 X_2 ,对 X_1 、 X_2 系数进行归一化处理,相减操作后得到特征量 $H_{m'n'}$,其中 $m'n'$ 对应着 4 个偏振态, $(H_{xx}H_{yy}-H_{xy}H_{yx})^{1/2}$ 包含了 ϕ_s 信息,对 4-FBG 阵列(反射率小于 1%)进行解调,背景噪声在 1 kHz 处从 -45 dB/Hz^{1/2} 降低到 -97 dB/Hz^{1/2},如图 10 所示。2017 年,Guo 等^[88]提出 Ghost Grating 理论,把光纤光栅阵列中的一阶串扰看作是看不见的 Ghost Grating 的直接反射,与第 i 个 FBG 有关的串扰对应着第 j 个 Ghost Grating,其中 $i+j=N'$ (N' 为 FBG 的个数),实际 FBG 波长变化 ± 100 pm 时,对应 Ghost Grating 波长在 ± 20 pm 范围内变化,这将导致实际 FBG 波长的测量精度误差为 ± 5 pm。

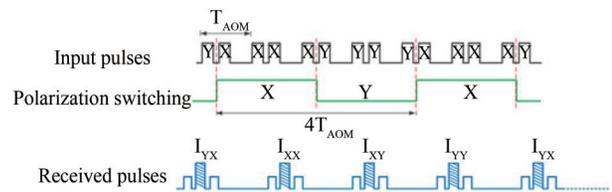


图 10 四偏振态脉冲解调 WFBG 阵列^[33]

Fig. 10 Demodulation of WFBG array using composite pulse with four polarization states^[33]

基于干涉仪匹配,对光强信号进行 3×3 耦合器零差对称解调^[89](NPS)或者 PGC 解调^[90]是常用的方法。2015 年,Wang 等^[91]采用 Michelson 干涉仪匹配后进行 NPS 计算,500-FBG 阵列(间隔为 2 m)在 450~600 Hz 处的声压灵敏度为 -158 dB (以 1 rad/ μ Pa 为参考值),如图 11 所示。2017 年,Zhang 等^[92]将光纤光栅阵列反射回来的脉冲光分为两路,一路与 10% (光强占比) 的光源混合以探测相邻 FBG 之间光纤内的振动事件,另一路进入匹配 Mach-Zehnder 后经 3×3 耦合器,输出相邻 FBG 之间光纤的相位变化。2017 年,Shang 等^[93]采用匹配 Michelson 干涉仪和 PGC 解调,利用 600-WFBG 阵列(间隔为 2 m)测量水下声振动信号,200~1500 Hz 内的频率响应平坦度为 1.4 dB。2018 年,

Tong 等^[94]通过空分复用的方式,采用匹配 Mach-Zehnder 干涉仪和 NPS 计算相位变化,以部分参考光源和光纤光栅阵列的透射光合束作为分布式传感系统测量振动源位置,可以检测 10 Hz~25 kHz 振动信号,测量应变时线性度为 0.9896,最大误差为 3.46 nε。2018 年, Li 等^[95]采用双波长激光和匹配 Mach-Zehnder 干涉仪,实现了静态温度测量(FBG 波长漂移)和动态相位变化检测(相邻 FBG 之间光纤变化),成功演示了 30~80 °C 温度和 12.5 kHz 声波这两种物理量的同时测量。2018 年, Wu 等^[96]采用部分光源与光纤光栅阵列反射脉冲光进行合束,构建参考 Mach-Zehnder 干涉仪,并通过正交偏振分集接收的方式同步测量系统 1/f 噪声以降低传感噪声,实测振动信号的信噪比达 70 dB, 10~2500 Hz 处的噪声为 3.84 pε/Hz^{1/2}。2019 年, Zhou 等^[97]联合 NPS 和 PGC 方法,把光纤光栅阵列中前两根 FBG

反射脉冲构成的第一个干涉脉冲作为参考脉冲,通过对光强的反正切计算,得出干涉光强的相位信息,在 2~10 Hz 范围内测得最小可探测声压为 2239 μPa/Hz^{1/2}。2019 年, Muanenda 等^[98]在匹配 Mach-Zehnder 干涉仪和 PGC 方法的基础上,将输出的光强分别乘以 $\cos \omega_0 t$ 和 $\cos 2\omega_0 t$ (ω_0 为输入光的角频率),滤除高频分量后即形成了相位差为 $\pi/2$ 的两个信号,对它们进行微分交叉相乘操作即可得出干涉光强的相位信息,测量 200-FBG 阵列(反射率为 -43 dB, 3 dB 带宽为 3.4 nm, 间隔为 5 m, 总长为 1 km)的振动信号, 2.5 kHz 处的信噪比约为 34.52 dB。2020 年,本课题组提出采用光纤延迟线方法解调 WFBG 阵列^[99],延迟线由 2×2 耦合器或 3×3 耦合器组成,采用该方法解调 5-WFBG 振动液柱中的水声信号和地板振动信号,均能真实地还原激励信号。

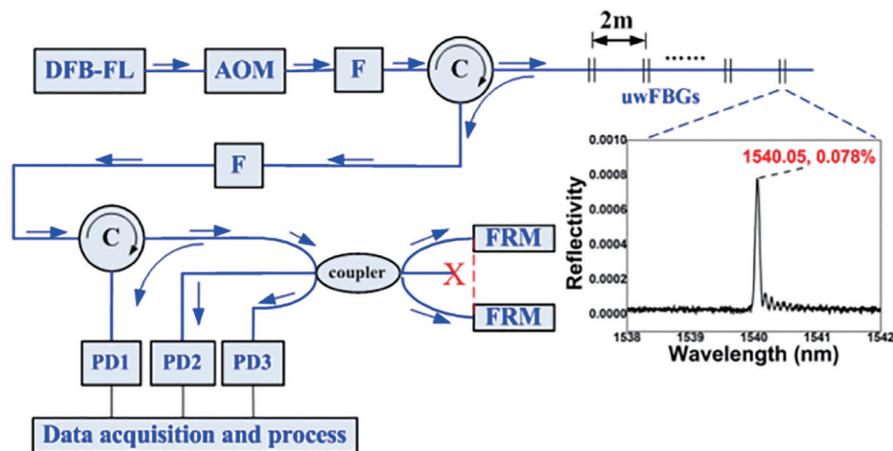


图 11 基于 Michelson 干涉仪解调 WFBG 阵列^[91]

Fig. 11 Demodulation of WFBG array using Michelson interferometer^[91]

通过构造特定的脉冲光也能够达到匹配干涉的目的。2015 年, Zhu 等^[100]设置光脉冲宽度稍大于光在相邻 FBG 之间往返传输的时间,此时相邻 FBG 反射的光脉冲将会在中间发生部分重叠进而产生干涉,采用信噪比的变化来表征外界应变大小的变化,空间分辨率为 2 m,量程为 5 km,误差为 6.2 nε。2017 年, Liu 等^[101]利用 AOM 将连续激光变为双脉冲光,双脉冲光里单个脉冲的周期等于激光在相邻 FBG 之间往返的时间,由此相邻 FBG 里前一个 FBG 反射的双脉冲里的后脉冲与后一个 FBG 反射的前脉冲在时间上重叠,发生干涉。由于该系统的信噪比较低,因此只能通过信噪比的变化来判断相邻 FBG 光纤是否有振动事件,检测频率范围为 3 Hz~9 kHz。2018 年, Liu 等^[102]在上述双脉冲的基

础上增加一路 10% (光强占比) 的参考光源进行共同干涉,以降低光源的噪声,对探测得到的光强信号进行 Hilbert 变换形成 $\pi/2$ 相移,通过对原始光强与移相后光强的比值进行反正切运算,即可得到干涉相位的变化,最小可检测光纤长度变化量为 14.63 nm,最低可探测 0.2 Hz 的正弦信号。2018 年, Ren 等^[103]构造了相位分别为 $-\pi/2$ 、0、 $\pi/2$ 的脉冲信号,探测得到它们的光强分别为 I_1 、 I_2 和 I_3 ,则外界振动引起的光强相位变化为 $\theta = \arctan[(I_3 - I_1)/(2I_2 - I_3 + I_1)]$,同时采用 0°、60°、120° 偏振分集接收光强信号,选取对比度最大的一路信号计算 θ ,系统的振动测试分辨率可达 3×10^{-4} rad/Hz^{1/2}。2018 年,黎威等^[104]采用宽脉冲使相邻 FBG 反射的光脉冲发生部分重叠干涉,并通过 NPS 方法得出振

动相位,实验验证了 10~500 Hz 内的振动信号。2019 年, Wang 等^[105]构造了两个脉冲,其中第一个脉冲为偏振 45° 的长脉冲,第二个脉冲为复合脉冲,由两个短组合脉冲构成(偏振角度分别为 0°、90°),第一个脉冲和第二个脉冲在时间上重合时必定会发生干涉,从而消除偏振衰落的影响,如图 12 所示。2019 年, Shan 等^[106]利用两个 AOM 分别构造了两个脉冲(其中一个脉冲在时序上落后于另一个脉冲),两个脉冲合束后被光纤光栅阵列反射进入探测器,其干涉原理与上述采用一个 AOM 构造双脉冲的方法相同,但该方法噪声较低,测量总长为 42 km、光栅间隔为 11.7 m 的阵列,在 8 Hz~1 kHz 的频率范围内,动态应变的峰峰值为 9.28 nε~176.96 nε,测量均方根误差小于 1.32 nε。2019 年, de Miguel 等^[107]采用宽脉冲使得相邻 FBG 中前后 FBG 反射的脉冲发生部分重叠干涉,利用前后 FBG 的反射光强 P_A 、 P_B 和干涉光强 P_{AB} ,即可获得干涉光强的相位信息,并通过解调 800-FBG 阵列(反射率为 0.02%)验证了该方法的可行性。2019 年, Wu 等^[108]将部分光源参考光与光纤光栅阵列的反射脉冲光进行合束干涉,利用 90°混频正交偏振集接收,再采用一个同步的 Mach-Zehnder 干涉仪和 90°混频正交偏振集接收检测脉冲光的噪声以补偿传感系统中的噪声,由此噪声降低了 11.56 dB,在 500~2500 Hz 范围内测试长度为 20 km、间隔为 20 m 的光纤光栅阵列,分辨率为 92.84 fε/Hz^{1/2}。2020 年,本课题提出采用大占空比双方波和 B-样条小波解调 WFBG 阵列^[109],通过 B-样条小波降低干涉强度信号的噪声,提高了干涉相位信号的解调精度。

综上所述,时域波长解调适用于点式的温度、应变的测量,利用 WFBG 阵列超大规模复用的优

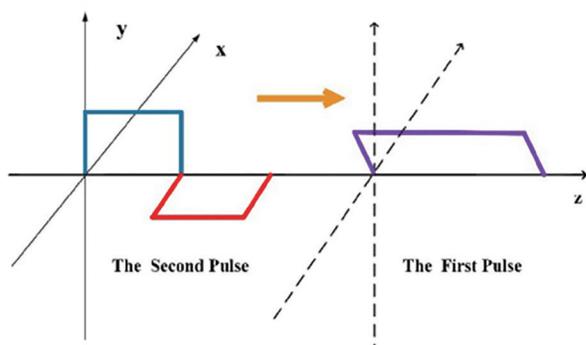


图 12 偏振双脉冲解调 WFBG 阵列^[105]

Fig. 12 Demodulation of WFBG array using two pulses with different polarization states^[105]

势,可以测量上千个点的温度、应变等。频域和微波光子解调适用于高频率、高分辨率的信号测量,依赖于超高速、超稳定的相位调制器。在非超高空间分辨率和非超高频振动的测量情况下,匹配干涉方法是一个不错的选择,它无需超高速率的光学器件,但与一般干涉传感系统一样,需要解决偏振变化的困扰。时域波长法利用 WFBG 波长的漂移进行解调,频域和微波光子法利用 WFBG 波长的漂移或者 WFBG 阵列栅距的变化进行解调,匹配干涉法利用 WFBG 阵列的栅距变化进行解调。当利用 WFBG 波长漂移时,需要制备 3 dB 带宽很窄的 WFBG 阵列;当利用 WFBG 阵列栅距变化时,需要制备 3 dB 带宽较宽的 WFBG 阵列。四种解调方式的应用场景并不相同,可以联合使用,从而达到采用单纤 WFBG 阵列进行多参量同时监测的目的。

4 弱反射光纤光栅阵列的应用

分布式光纤和 FBG 传感技术的成熟与商业化应用是相互推动的,而分布式光纤光栅阵列要实现商业化大规模运用,就必须走出实验室。

4.1 激光器制造领域

在激光器制造领域,2016 年,许儒泉等^[110]采用 4.3×10^5 元光纤光栅阵列(栅长为 0.3 mm,总长为 130 m,总体 3 dB 带宽为 2 nm)构成环形谐振腔,输出激光线宽为 1.25 kHz,最大功率为 1.26 mW,相对强度噪声为 -90 dB。2018 年, Popov 等^[111]采用一个反射率为 70% 的 FBG 和一个 100 m 长的光纤光栅阵列(单个 FBG 反射率约为 0.001%,间隔约为 1.1 cm,总反射率为 30%,3 dB 带宽为 0.25 nm)构成激光器谐振腔,输出 Brillouin 激光线宽小于 10 kHz。2018 年,秦晓琼等^[112]把一根弱反射 FBG 串接在单光纤环(由 2×2 耦合器构成,反射率为 11.6 dB)和双光纤环中,实现了慢光效应,该 FBG-单光纤环作为线型腔激光器的输出腔镜,输出激光线宽被压窄至 150 Hz,若采用双光纤环,线宽有望进一步被压窄。

4.2 传感领域

在大型结构健康监测领域,2019 年, Gan 等^[113]在地铁隧道壁和铁轨边缘铺设了 3 km 的 500-FBG 阵列,在地表 5 个区域模拟开挖过程,通过检测相位的均方根变化,判断出了开挖点; Nan 等^[114]利用铁轨边缘的光纤光栅阵列振动,判别出了列车车厢位置、速度、长度和数量,并着重模拟了人入侵时的振

动模式,由于人入侵模式过于复杂,真正有效的判别还需要进一步研究。2020年,Xin等^[115]在上述监测数据的基础上,从多尺度分析的角度判别入侵和非入侵事件,平均识别率达到96.57%。2021年,何健辉等^[116]采用弱反射光纤光栅阵列监测衡水市的地面沉降,量程为20 km,空间分辨率为1 m。

在重要区域的氢气浓度、温度、湿度、盐度检测,2016年,Bai等^[117]通过剥除光纤光栅的涂覆层和浸泡硅烷偶联剂,增加了聚合物附着力,通过聚酰亚胺吸水,FBG波长产生漂移,采用1124-FBG阵列检测相对湿度(RH),相对湿度在23.8%~83.4%之间变化时,灵敏度为1.134~1.832 pm/% RH。2017年,Bai等^[118]采用144-FBG阵列(反射率为0.04%)同时监测氢气浓度、温度、湿度和盐度,解决了四个物理量相互交叉敏感的问题,其中测量氢气浓度的FBG涂覆为钯/镍(Pd/Ni)合金,测量湿度的FBG涂覆为聚酰亚胺。2020年,李士峰等^[119]设计了一种光纤光栅电池包壳体,把光纤光栅阵列嵌在壳体内,每个FBG实时监控壳体舱内对应的储能电池温度。2020年,罗志会等^[120]将23元铠装光纤光栅阵列装在大天区面积多目标光纤光谱天文望远镜中,监测望远镜内部的温度变化,温度线性度优于0.9997,灵敏度约为10.8 pm/°C。

在水下声目标探测领域,2017年,Lavrov等^[121]将厚度为3.5 mm的RTV655材料(杨氏模量为5.6 MPa,泊松比为0.49932)涂覆在7-FBG阵列(栅距为1.5 m)表面,并在外层包裹增强聚合物纤维和热塑塑料,构建直径小于20 mm、总长为60 m的分布式光纤光栅水听器线列阵,将该线列阵垂直放入水中,测得40 Hz时声压灵敏度和最低可探测声压分别为-143.7 dB(以1 rad/ μ Pa为参考值)和8.3 mPa/Hz^{1/2},495 Hz时分别为-169.4 dB、53 mPa/Hz^{1/2}。2018年,张英东等^[122]根据McMahon等^[123]的理论模型,给出了杨氏模量小、泊松比大的涂覆材料可以应用于分布式光纤光栅阵列水听器增敏的建议。2019年,郭振等^[124]把WFBG阵列缠绕在弹性体材料上,构建了32元直径为20 mm的水听器阵列,平均声压灵敏度为-143 dB。该芯轴型水听器利用缠绕基体增敏,直径大幅度降低,但刚性的缠绕基体制约了整体拖线阵的体积减小。2020年,Li等^[125]通过将微结构光纤缠绕在空气腔圆柱体上,构建了声传感器,500 Hz~5 kHz频段的平均声压-相位灵敏度为-112.5 dB

(以1 rad/ μ Pa为参考值),80 Hz处的灵敏度高达-83.7 dB(以1 rad/ μ Pa为参考值)。2020年,庞彦东^[126]采用聚醚聚氨酯对光纤光栅阵列进行涂覆,构建了直径为0.9 mm的分布式光纤光栅水听器线列阵(栅距为50 m),200~2000 Hz频段内的声压灵敏度为-180 dB~-130 dB(以1 rad/ μ Pa为参考值)。2020年,本课题组把WFBG阵列分布放置在木地板上,构建了分布式声传感器^[127],测量5个方向的325 Hz单频声信号,频率均方根误差为18.05 Hz(误差率为5.55%),方向均方根误差为1.35°。

5 结束语

介绍了WFBG阵列的制备、解调和应用进展。其中,WFBG阵列的制备主要基于拉丝塔拉丝在线刻栅系统,紫外透明包层光纤和特殊掺杂光纤将继续推动制备技术向更高层次发展。信号解调技术主要根据应用的需求,可以从时域波长、频域、微波光子和匹配干涉四种解调方法中选取。WFBG阵列还没有得到推广应用,主要原因是拉丝塔光刻系统昂贵、工艺复杂,但WFBG阵列的细直径、大力学强度、超大规模复用等优势使其具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Ye X W, Yi T H, Su Y H, et al. Strain-based structural condition assessment of an instrumented arch bridge using FBG monitoring data[J]. Smart Structures and Systems, 2017, 20(2): 139-150.
- [2] Ye X W, Ding P, Zhou C, et al. Monitoring of metro-tunnel freezing construction using fiber sensing technology[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2013, 47(6): 1072-1080.
叶肖伟, 丁朋, 周诚, 等. 基于光纤传感技术的地铁隧道冻结法施工监测[J]. 浙江大学学报(工学版), 2013, 47(6): 1072-1080.
- [3] Zhang Y J, Jia B B, Huang B K, et al. Research on mine collapse monitoring based on distributed grating sensor network[J]. Laser & Infrared, 2012, 42(3): 319-323.
张燕君, 贾冰冰, 黄保凯, 等. 基于分布式光栅传感网络的矿井坍塌监测研究[J]. 激光与红外, 2012, 42(3): 319-323.
- [4] Sahota J K, Gupta N, Dhawan D. Fiber Bragg grating sensors for monitoring of physical parameters: a

- comprehensive review[J]. *Optical Engineering*, 2020, 59(6): 060901.
- [5] Zhao Y, Hu X G, Hu S, et al. Applications of fiber-optic biochemical sensor in microfluidic chips: a review[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2020, 166: 112447.
- [6] Grattan K T V, Sun T. Fiber optic sensor technology: an overview[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2000, 82(1/2/3): 40-61.
- [7] Liao Y B, Yuan L B, Tian Q, et al. The 40 years of optical fiber sensors in China[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0328001.
廖延彪, 苑立波, 田芊. 中国光纤传感 40 年[J]. *光学学报*, 2018, 38(3): 0328001.
- [8] Juarez J C, Maier E W, Choi K N, et al. Distributed fiber-optic intrusion sensor system[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2005, 23(6): 2081-2087.
- [9] Bernini R, Minardo A, Testa G, et al. Dynamic strain measurements on a cantilever beam using stimulated Brillouin scattering[J]. *Smart Materials and Structures*, 2010, 19(4): 045024.
- [10] Lin G B. Interferometric fiber devices and their applications in optical fiber communications and sensors[D]. Xiamen: Xiamen University, 2013.
林淦斌. 干涉型光纤器件及其在光通信与光纤传感方面应用的研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2013.
- [11] Su J. Research on characteristics of characteristic wavelength of few mode fiber and its application in sensing[D]. Xiamen: Xiamen University, 2016.
苏娟. 具有特征波长的少模光纤特性及其在传感方面的应用研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2016.
- [12] Yu H H, Zheng Y, Guo H Y, et al. Research progress in online preparation techniques of fiber Bragg gratings on optical fiber drawing tower[J]. *Journal of Functional Materials*, 2014, 45(12): 12001-12005.
余海湖, 郑羽, 郭会勇, 等. 光纤光栅在线制备技术研究进展[J]. *功能材料*, 2014, 45(12): 12001-12005.
- [13] Hnatovsky C, Grobnc D, Mihailov S J, et al. High-temperature stable π -phase-shifted fiber Bragg gratings inscribed using infrared femtosecond pulses and a phase mask[J]. *Optics Express*, 2018, 26(18): 23550-23564.
- [14] Hill K O, Fujii Y, Johnson D C, et al. Photosensitivity in optical fiber waveguides: application to reflection filter fabrication[J]. *Applied Physics Letters*, 1978, 32(10): 647-649.
- [15] Meltz G, Morey W W, Glenn W H, et al. Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method[J]. *Optics Letters*, 1989, 14(15): 823-825.
- [16] Martinez A, Dubov M, Khrushchev I, et al. Direct writing of fibre Bragg gratings by femtosecond laser[J]. *Electronics Letters*, 2004, 40(19): 1170-1172.
- [17] Sun Y Z, Yu C X, Lin J T, et al. Experimental analysis of photoinduced absorption change in a boron-codoped germanosilicate preform based on the color-center model[J]. *Journal of China Institute of Communications*, 2000, 21(7): 45-49.
孙英志, 余重秀, 林金桐. 基于色心模型掺杂硼锗光纤材料紫外光诱导光敏特性的实验分析[J]. *通信学报*, 2000, 21(7): 45-49.
- [18] Li J Z, Jiang D S. Hydrogen loading and fiber Bragg grating[J]. *Chinese Journal of Materials Research*, 2006, 20(5): 518-522.
李剑芝, 姜德生. 载氢与光纤布喇格光栅[J]. *材料研究学报*, 2006, 20(5): 518-522.
- [19] Askins C G, Tsai T E, Williams G M, et al. Fiber Bragg reflectors prepared by a single excimer pulse[J]. *Optics Letters*, 1992, 17(11): 833-835.
- [20] Archambault J L, Reekie L, Russell P J, et al. High reflectivity and narrow bandwidth fibre gratings written by single excimer pulse[J]. *Electronics Letters*, 1993, 29(1): 28-29.
- [21] Dong L, Archambault J L, Reekie L, et al. Single pulse Bragg gratings written during fibre drawing[J]. *Electronics Letters*, 1993, 29(17): 1577-1578.
- [22] Askins C G, Putnam M A, Williams G M, et al. Stepped-wavelength optical-fiber Bragg grating arrays fabricated in line on a draw tower[J]. *Optics Letters*, 1994, 19(2): 147-149.
- [23] Rothhardt M, Chojetzki C, Mueller H R, et al. High mechanical strength single-pulse draw tower gratings[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5579: 127-135.
- [24] Rothhardt M, Becker M, Chojetzki C, et al. Strain sensor chains beyond 1000 individual fiber Bragg gratings[C]//Advanced Photonics & Renewable Energy, June 21-24, 2010, Karlsruhe, Germany. Washington, D.C.: OSA, 2010: JThA53.
- [25] Lindner E, Hartung A, Hoh D, et al. Trends and future of fiber Bragg grating sensing technologies: tailored draw tower gratings (DTGs)[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9141: 91410X.
- [26] Yang M H, Bai W, Guo H Y, et al. Huge capacity fiber-optic sensing network based on ultra-weak draw tower gratings[J]. *Photonic Sensors*, 2016, 6(1):

- 26-41.
- [27] Guo H Y, Yu H H, Wu Y W, et al. Preparation of photosensitive fibers for weak fiber Bragg grating arrays[J]. *Physics Procedia*, 2013, 48: 184-190.
- [28] Guo H Y, Tang J G, Li X F, et al. On-line writing identical and weak fiber Bragg grating arrays[J]. *Chinese Optics Letters*, 2013, 11(3): 030602.
- [29] Zheng Y, Yu H H, Guo H Y, et al. Analysis of the spectrum distortions of weak fiber Bragg gratings fabricated in-line on a draw tower by the phase mask technique[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(12): 2670-2673.
- [30] Guo H Y, Liu F, Yuan Y Q, et al. Ultra-weak FBG and its refractive index distribution in the drawing optical fiber[J]. *Optics Express*, 2015, 23(4): 4829-4838.
- [31] Sun Q Z, Liu D M, Wo J H, et al. Distributed sensor optical fiber as well as preparation device and method thereof: CN102053303B[P]. 2011-05-11. 孙琪真, 刘德明, 沃江海, 等. 一种分布式传感光纤及其制备装置和方法: CN102053303B[P]. 2011-05-11.
- [32] Wang Y M, Gong J M, Dong B, et al. A large serial time-division multiplexed fiber Bragg grating sensor network[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(17): 2751-2756.
- [33] Jiang P, Ma L N, Hu Z L, et al. Low-crosstalk and polarization-independent inline interferometric fiber sensor array based on fiber Bragg gratings[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(18): 4232-4239.
- [34] Chen Z, Hefferman G, Wei T, et al. Terahertz-range weak reflection fiber optic structures for sensing applications[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2017, 23(2): 246-251.
- [35] Tokarev A V, Anchutkin G G, Varzhel S V, et al. UV-transparent fluoropolymer fiber coating for the inscription of chirped Bragg gratings arrays[J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, 89: 173-178.
- [36] Monet F, Loranger S, Iezzi V L, et al. The ROGUE: a novel, noise-generated random grating[J]. *Optics Express*, 2019, 27(10): 13895-13909.
- [37] Elsmann T, Becker M, Olusoji O, et al. Two-step-model of photosensitivity in cerium-doped fibers[J]. *Optical Materials Express*, 2019, 9(4): 1654-1666.
- [38] Rao Y J. *Optical fiber technology*[M]. Beijing: Science Press, 2006. 饶云江. *光纤技术*[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [39] Wu J, Wu H P, Huang J B, et al. Research progress in signal demodulation technology of fiber Bragg grating sensors[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(4): 519-531. 吴晶, 吴晗平, 黄俊斌, 等. 光纤光栅传感信号解调技术研究进展[J]. *中国光学*, 2014, 7(4): 519-531.
- [40] Valente L C G, Braga A M B, Ribeiro A S, et al. Time and wavelength multiplexing of fiber Bragg grating sensors using a commercial OTDR[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2002(1): 151-154.
- [41] Valente L C G, Braga A M B, Ribeiro A S, et al. Combined time and wavelength multiplexing technique of optical fiber grating sensor arrays using commercial OTDR equipment[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2003, 3(1): 31-35.
- [42] Zhang W G, Kai G Y, Dong X Y, et al. Theoretical and experimental study of fiber grating multi-point sensing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(3): 330-336. 张伟刚, 开桂云, 董孝义, 等. 光纤光栅多点传感的理论及实验研究[J]. *光学学报*, 2004, 24(3): 330-336.
- [43] Dai Y B, Liu Y J, Leng J S, et al. A novel time-division multiplexing fiber Bragg grating sensor interrogator for structural health monitoring[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2009, 47(10): 1028-1033.
- [44] Zhang M L, Sun Q Z, Wang Z, et al. A large capacity sensing network with identical weak fiber Bragg gratings multiplexing[J]. *Optics Communications*, 2012, 285(13/14): 3082-3087.
- [45] Wang X C, Yan Z J, Wang F, et al. An OTDR and gratings assisted multifunctional fiber sensing system[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(8): 4660-4666.
- [46] Wang Y M, Hu C C, Liu Q, et al. High speed demodulation method of identical weak fiber Bragg gratings based on wavelength-sweep optical time-domain reflectometry[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(20): 204209. 王一鸣, 胡陈晨, 刘泉, 等. 基于连续扫频光时域反射的全同弱光栅高速解调方法[J]. *物理学报*, 2016, 65(20): 204209.
- [47] Han P, Li Z Y, Chen L, et al. A high-speed distributed ultra-weak FBG sensing system with high resolution[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(15): 1249-1252.
- [48] Liu Q, Wang Y M, Li Z Y, et al. High-speed interrogation system of multi-encoding weak FBGs based on FDML wavelength swept laser[J]. *Optics &*

- Laser Technology, 2018, 107: 54-58.
- [49] Luo Z H, Guo H Y, Wen H Q, et al. Interrogation system for a sensor array with 1310-nm band ultra-weak fiber Bragg gratings[J]. Optical Engineering, 2013, 52(10): 107101.
- [50] Hu C Y, Wen H Q, Bai W, et al. A novel interrogation system for large scale sensing network with identical ultra-weak fiber Bragg gratings[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(7): 1406-1411.
- [51] Zhang Y J, Xie X P, Bi W H, et al. High-speed high-multiplexing distributed temperature sensor network based on weak-reflection fiber gratings[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(4): 0405006.
张燕君, 谢晓鹏, 毕卫红. 基于弱光栅的高速高复用分布式温度传感网络[J]. 中国激光, 2013, 40(4): 0405006.
- [52] Cheng R, Xia L. Interrogation of weak Bragg grating sensors based on dual-wavelength differential detection[J]. Optics Letters, 2016, 41(22): 5254-5257.
- [53] Rohollahnejad J, Xia L, Cheng R, et al. TDM interrogation of intensity-modulated USFBGs network based on multichannel lasers[J]. Optics Express, 2017, 25(2): 670-680.
- [54] Zhang J, Yang L Z, Yang H H, et al. A novel demodulation scheme for high precision quasi-distributed sensing system based on chaotic fiber laser [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2015, 233: 427-433.
- [55] Arias A, Shlyagin M G, Miridonov S V, et al. Phase-sensitive correlation optical time-domain reflectometer using quantum phase noise of laser light [J]. Optics Express, 2015, 23(23): 30347-30356.
- [56] Yi H, Xia L, Xu J, et al. A liquid-level sensing technique based on differential detection of correlation peaks from broadband chaos[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(5): 1-9.
- [57] Ma L M, Ma C, Wang Y M, et al. High-speed distributed sensing based on ultra weak FBGs and chromatic dispersion[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(12): 1344-1347.
- [58] Sartiano D, Sales S. Monitoring temperature and vibration in a long weak grating array with short-pulse generation using a compact gain-switching laser diode module[J]. Optics Express, 2019, 27(26): 38661-38669.
- [59] Yuksel K, Wuilpart M, Moeyaert V, et al. Optical frequency domain reflectometry: a review[C]//2009 11th International Conference on Transparent Optical Networks, June 28-July 2, 2009, Ponta Delgada, Portugal. New York: IEEE Press, 2009: 1-5.
- [60] Ye F, Qian L, Liu Y, et al. Using frequency-shifted interferometry for multiplexing a fiber Bragg grating array[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20(17): 1488-1490.
- [61] Glombitza U, Brinkmeyer E. Coherent frequency-domain reflectometry for characterization of single-mode integrated-optical waveguides[J]. Journal of Lightwave Technology, 1993, 11(8): 1377-1384.
- [62] Yuksel K, M egret P, Wuilpart M, et al. A quasi-distributed temperature sensor interrogated by optical frequency-domain reflectometer[J]. Measurement Science and Technology, 2011, 22(11): 115204.
- [63] Ye F, Zhang Y W, Qi B, et al. Frequency-shifted interferometry: a versatile fiber-optic sensing technique[J]. Sensors, 2014, 14(6): 10977-11000.
- [64] Qi B, Ye F, Qian L, et al. Reflectometry based on a frequency-shifted interferometer using sideband interference[J]. Optics Letters, 2013, 38(7): 1083-1085.
- [65] Zhang Y W, Ye F, Qi B, et al. Multipoint sensing with a low-coherence source using single-arm frequency-shifted interferometry[J]. Applied Optics, 2016, 55(21): 5526-5530.
- [66] Guo H Y, Gnanapandithan A, Liu Y, et al. Single-arm frequency-shifted interferometry using a bidirectional electro-optic modulator[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(4): 1310-1316.
- [67] Yang Q, Wang J Q, Fu X L, et al. High-spatial resolution demodulation of weak FBGs based on incoherent optical frequency domain reflectometry using a chaotic laser[C]//2019 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), May 20-23, 2019, Auckland, New Zealand. New York: IEEE Press, 2019: 994-998.
- [68] Ou Y W, Zhou C M, Qian L, et al. Large-capacity multiplexing of near-identical weak fiber Bragg gratings using frequency-shifted interferometry[J]. Optics Express, 2015, 23(24): 31484-31495.
- [69] Ou Y W, Zhou C M, Qian L, et al. Large WDM FBG sensor network based on frequency-shifted interferometry[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(6): 535-538.

- [70] Ou Y W, Cheng C F, Zhou C M, et al. Synchronous reflectivity measurement of a weak fiber Bragg grating array using frequency-shifted interferometry[J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(2): 1-9.
- [71] Li Z Y, Sun W F, Wang H H, et al. Research on the ultra-weak reflective fiber Bragg grating sensing technology based on optical frequency domain reflection technology[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(8): 0806003.
李政颖, 孙文丰, 王洪海. 基于光频域反射技术的超弱反射光纤光栅传感技术研究[J]. 光学学报, 2015, 35(8): 0806003.
- [72] Gui X, Li Z Y, Wang F, et al. Distributed sensing technology of high-resolution based on dense ultra-short FBG array with large multiplexing capacity[J]. Optics Express, 2017, 25(23): 28112-28122.
- [73] Sun Q Z, Ai F, Liu D M, et al. M-OTDR sensing system based on 3D encoded microstructures[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 41137.
- [74] Wang J Y, Ai F, Cheng J W, et al. High accurate and stable demodulation for 3-D encoded optical fiber sensing network[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2018, 30(18): 1657-1660.
- [75] Cheng J W, Sun Q Z, Ai F, et al. High-speed and high-resolution demodulation system for the hybrid WDM/FDM based fiber microstructure sensing network[J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(3): 1-11.
- [76] Ricchiuti A L, Hervás J, Barrera D, et al. Microwave photonics filtering technique for interrogating a very-weak fiber Bragg grating cascade sensor[J]. IEEE Photonics Journal, 2014, 6(6): 1-10.
- [77] Urick V J, Jr, McKinney J D, Williams K J. Fundamentals of microwave photonics[M]. Xiang P, Pu T, Shen H P, Transl. Beijing: Electronic Industry Press, 2017: 152-153.
(美)文森特.J. 尤里克, 詹森 D. 麦金尼, 基思 J. 威廉斯. 微波光子学基础[M]. 项鹏, 蒲涛, 沈荟萍, 译. 北京: 电子工业出版社, 2017: 152-153.
- [78] Pu T, Wen C H, Xiang P, et al. Principle and application of microwave photonics[M]. Beijing: Publishing House of Electronics industry, 2015.
蒲涛, 闻传花, 项鹏, 等. 微波光子学原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015.
- [79] Hervás J, Pousa C R F, Barrera D, et al. An interrogation technique of FBG cascade sensors using wavelength to radio-frequency delay mapping[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(11): 2222-2227.
- [80] Xia L, Cheng R, Li W, et al. Identical FBG-based quasi-distributed sensing by monitoring the microwave responses[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(3): 323-325.
- [81] Clement J, Torregrosa G, Hervás J, et al. Interrogation of a sensor array of identical weak FBGs using dispersive incoherent OFDR[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(10): 1154-1156.
- [82] Zhou L, Li Z Y, Xiang N, et al. High-speed demodulation of weak fiber Bragg gratings based on microwave photonics and chromatic dispersion[J]. Optics Letters, 2018, 43(11): 2430-2433.
- [83] Liang X, Xiang N, Li Z Y, et al. Precision dynamic sensing with ultra-weak fiber Bragg grating arrays by wavelength to frequency transform[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(14): 3526-3531.
- [84] Kersey A D, Dandridge A, Tveten A B, et al. Overview of multiplexing techniques for interferometric fiber sensors[J]. Proceedings of SPIE, 1988, 0838: 184-193.
- [85] Morey W W, Dunphy J R, Meltz G, et al. Multiplexing fiber Bragg grating sensors[J]. Proceedings of SPIE, 1992, 1586: 216-224.
- [86] Waagaard O H, Rønnekleiv E, Forbord S, et al. Reduction of crosstalk in inline sensor arrays using inverse scattering[J]. Proceedings of SPIE, 2008, 7004: 70044Z.
- [87] Waagaard O H, Rønnekleiv E, Forbord S, et al. Suppression of cable induced noise in an interferometric sensor system[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7503: 75034Q.
- [88] Guo H Y, Qian L, Zhou C M, et al. Crosstalk and ghost gratings in a large-scale weak fiber Bragg grating array[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(10): 2032-2036.
- [89] Koo K P, Tveten A B, Dandridge A, et al. Passive stabilization scheme for fiber interferometers using (3×3) fiber directional couplers[J]. Applied Physics Letters, 1982, 41(7): 616-618.
- [90] Dandridge A, Tveten A, Giallorenzi T, et al. Homodyne demodulation scheme for fiber optic sensors using phase generated carrier[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1982, 18(10): 1647-1653.
- [91] Wang C, Shang Y, Liu X H, et al. Distributed

- OTDR-interferometric sensing network with identical ultra-weak fiber Bragg gratings[J]. *Optics Express*, 2015, 23(22): 29038-29046.
- [92] Zhang X P, Sun Z H, Shan Y Y, et al. A high performance distributed optical fiber sensor based on Φ -OTDR for dynamic strain measurement[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(3): 1-12.
- [93] Shang Y, Yang Y H, Wang C, et al. Quasi-distributed acoustic sensing based on identical low-reflective fiber Bragg gratings[J]. *Measurement Science and Technology*, 2017, 28(1): 015202.
- [94] Tong Y H, Li Z Y, Wang J Q, et al. High-speed Mach-Zehnder-OTDR distributed optical fiber vibration sensor using medium-coherence laser[J]. *Photonic Sensors*, 2018, 8(3): 203-212.
- [95] Li Z Y, Tong Y H, Fu X L, et al. Simultaneous distributed static and dynamic sensing based on ultra-short fiber Bragg gratings[J]. *Optics Express*, 2018, 26(13): 17437-17446.
- [96] Wu M S, Fan X Y, Liu Q W, et al. Highly sensitive quasi-distributed fiber-optic acoustic sensing system by interrogating a weak reflector array[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(15): 3594-3597.
- [97] Zhou C M, Pang Y D, Qian L, et al. Demodulation of a hydroacoustic sensor array of fiber interferometers based on ultra-weak fiber Bragg grating reflectors using a self-referencing signal[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(11): 2568-2576.
- [98] Muanenda Y, Faralli S, Oton C J, et al. Dynamic phase extraction in high-SNR DAS based on UWFBGs without phase unwrapping using scalable homodyne demodulation in direct detection[J]. *Optics Express*, 2019, 27(8): 10644-10658.
- [99] Ding P, Liu W, Gu H C, et al. Demodulation of a weak fiber Bragg grating array using a fiber delay line [J]. *Applied Optics*, 2020, 59(8): 2325-2328.
- [100] Zhu F, Zhang Y X, Xia L, et al. Improved Φ -OTDR sensing system for high-precision dynamic strain measurement based on ultra-weak fiber Bragg grating array[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(23): 4775-4780.
- [101] Liu T, Wang F, Zhang X P, et al. Phase sensitive distributed vibration sensing based on ultraweak fiber Bragg grating array using double-pulse[J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(8): 084104.
- [102] Liu T, Wang F, Zhang X P, et al. Interrogation of ultra-weak FBG array using double-pulse and heterodyne detection[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, 30(8): 677-680.
- [103] Ren Z J, Cui K, Zhu R H, et al. Efficient and compact inline interferometric fiber sensor array based on fiber Bragg grating and rectangular-pulse binary phase modulation[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(23): 9556-9561.
- [104] Li W, Zhang Y J. Enhanced phase sensitive optical time-domain reflectometer vibration sensing system based on weak grating array[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(8): 0810001.
黎威, 张永佳. 基于弱光栅阵列的增强相位敏感光时域反射仪振动传感系统[J]. *中国激光*, 2018, 45(8): 0810001.
- [105] Wang F, Liu Y, Wei T, et al. Polarization fading elimination for ultra-weak FBG array-based Φ -OTDR using a composite double probe pulse approach[J]. *Optics Express*, 2019, 27(15): 20468-20478.
- [106] Shan Y Y, Ji W B, Dong X Y, et al. An enhanced distributed acoustic sensor based on UWFBG and self-heterodyne detection[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(11): 2700-2705.
- [107] de Miguel S V, Jason J, Kurtoğlu D, et al. Spectral shadowing suppression technique in phase-OTDR sensing based on weak fiber Bragg grating array[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(3): 526-529.
- [108] Wu M S, Fan X Y, Liu Q W, et al. Quasi-distributed fiber-optic acoustic sensing system based on pulse compression technique and phase-noise compensation[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(24): 5969-5972.
- [109] Ding P, Huang J B, Gu H C, et al. Demodulation of weak fiber Bragg grating using a double square wave and B-spline wavelet[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(3): 0306002.
丁朋, 黄俊斌, 顾宏灿, 等. 采用双方波信号和B-样条小波解调弱反射光纤布拉格光栅[J]. *光子学报*, 2020, 49(3): 0306002.
- [110] Xu R Q, Guo H Y, Li W, et al. Ultra-narrow linewidth random fiber laser based on all grating fiber [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(12): 1201005.
许儒泉, 郭会勇, 黎威, 等. 基于全光栅光纤的超窄线宽随机光纤激光器[J]. *中国激光*, 2016, 43(12): 1201005.
- [111] Popov S M, Butov O V, Chamorovski Y K, et al. Narrow linewidth short cavity Brillouin random laser

- based on Bragg grating array fiber and dynamical population inversion gratings[J]. *Results in Physics*, 2018, 9: 806-808.
- [112] Qin X Q, Fang Z J, Ying K, et al. Narrow linewidth all-fiber ring filters[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(10): 1006001.
秦晓琼, 方祖捷, 应康, 等. 窄线宽全光纤环形滤波器特性研究[J]. *光学学报*, 2018, 38(10): 1006001.
- [113] Gan W B, Li S, Li Z Y, et al. Identification of ground intrusion in underground structures based on distributed structural vibration detected by ultra-weak FBG sensing technology[J]. *Sensors*, 2019, 19(9): 2160.
- [114] Nan Q, Li S, Yao Y, et al. A novel monitoring approach for train tracking and incursion detection in underground structures based on ultra-weak FBG sensing array[J]. *Sensors*, 2019, 19(12): 2666.
- [115] Xin L P, Li Z Y, Gui X, et al. Surface intrusion event identification for subway tunnels using ultra-weak FBG array based fiber sensing[J]. *Optics Express*, 2020, 28(5): 6794-6805.
- [116] He J H, Zhang J C, Chen Y, et al. Automatic land subsidence monitoring system based on weak-reflection fiber gratings[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(1): 146-153.
何健辉, 张进才, 陈勇, 等. 基于弱光栅技术的地面沉降自动化监测系统[J]. *水文地质工程地质*, 2021, 48(1): 146-153.
- [117] Bai W, Yang M H, Dai J X, et al. Novel polyimide coated fiber Bragg grating sensing network for relative humidity measurements[J]. *Optics Express*, 2016, 24(4): 3230-3237.
- [118] Bai W, Yang M H, Hu C Y, et al. Ultra-weak fiber Bragg grating sensing network coated with sensitive material for multi-parameter measurements[J]. *Sensors*, 2017, 17(7): 1509.
- [119] Li S F, Yang Z Z, Cai T, et al. Temperature monitoring system of energy storage battery based on ultra-weak reflectivity fiber Bragg grating[J]. *Internet of Things Technologies*, 2020, 10(6): 31-32.
李士峰, 杨振忠, 蔡天, 等. 基于超低反射率光纤光栅的储能电池温度监测系统[J]. *物联网技术*, 2020, 10(6): 31-32.
- [120] Luo Z H, Zhang Y, Zhang Y, et al. Internal space temperature monitoring method for LAMOST based on ultra-weak fiber grating[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2020, 39(12): 10-13.
罗志会, 张宇, 张勇, 等. 基于超弱光纤光栅的LAMOST内部温度监测方法[J]. *传感器与微系统*, 2020, 39(12): 10-13.
- [121] Lavrov V S, Plotnikov M Y, Aksarin S M, et al. Experimental investigation of the thin fiber-optic hydrophone array based on fiber Bragg gratings[J]. *Optical Fiber Technology*, 2017, 34: 47-51.
- [122] Zhang Y D, Huang J B, Gu H C, et al. Research on underwater acoustic detection mechanism of weak reflective fiber Bragg grating hydrophone[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2018, 38(12): 180-184.
张英东, 黄俊斌, 顾宏灿, 等. 弱反射光纤光栅水听器水声探测机理研究[J]. *舰船电子工程*, 2018, 38(12): 180-184.
- [123] McMahon G W, Cielo P G. Fiber optic hydrophone sensitivity for different sensor configurations[J]. *Applied Optics*, 1979, 18(22): 3720-3722.
- [124] Guo Z, Gao K, Yang H, et al. 20-mm-diameter interferometric hydrophone towed array based on fiber Bragg gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(11): 1106003.
郭振, 高侃, 杨辉, 等. 外径 20 mm 的光纤光栅干涉型拖曳水听器阵列[J]. *光学学报*, 2019, 39(11): 1106003.
- [125] Li H, Sun Q Z, Liu T, et al. Ultra-high sensitive quasi-distributed acoustic sensor based on coherent OTDR and cylindrical transducer[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(4): 929-938.
- [126] Pang Y D. Research on key technology for ultrathin fiber-optic hydrophone based on draw tower fiber Bragg grating array[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2020.
庞彦东. 基于拉丝塔光栅阵列的超细线光纤水听器关键技术研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2020.
- [127] Ding P, Wu J, Kang D, et al. Detection of acoustic wave direction using weak-reflection fiber Bragg gratings[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(5): 0506002.
丁朋, 吴晶, 康德, 等. 采用弱反射光纤布拉格光栅的声波方向检测[J]. *中国激光*, 2020, 47(5): 0506002.